

# Middlesex University Research Repository

An open access repository of

Middlesex University research

<http://eprints.mdx.ac.uk>

Ballesteros, C., Jiménez, J. A. and Viavattene, Christophe ORCID logoORCID:  
<https://orcid.org/0000-0002-4358-5411> (2017) Evaluación del riesgo de inundación a múltiples  
componentes en la costa del Maresme. Ribagua, 4 (2) . pp. 110-129. ISSN 2529-8968 [Article]  
(doi:10.1080/23863781.2017.1381453)

Published version (with publisher's formatting)

This version is available at: <https://eprints.mdx.ac.uk/23156/>

## Copyright:

Middlesex University Research Repository makes the University's research available electronically.

Copyright and moral rights to this work are retained by the author and/or other copyright owners unless otherwise stated. The work is supplied on the understanding that any use for commercial gain is strictly forbidden. A copy may be downloaded for personal, non-commercial, research or study without prior permission and without charge.

Works, including theses and research projects, may not be reproduced in any format or medium, or extensive quotations taken from them, or their content changed in any way, without first obtaining permission in writing from the copyright holder(s). They may not be sold or exploited commercially in any format or medium without the prior written permission of the copyright holder(s).

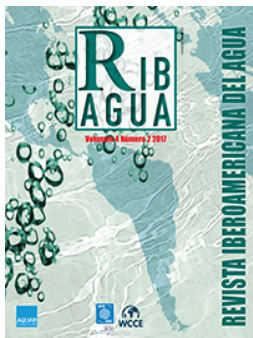
Full bibliographic details must be given when referring to, or quoting from full items including the author's name, the title of the work, publication details where relevant (place, publisher, date), pagination, and for theses or dissertations the awarding institution, the degree type awarded, and the date of the award.

If you believe that any material held in the repository infringes copyright law, please contact the Repository Team at Middlesex University via the following email address:

[eprints@mdx.ac.uk](mailto:eprints@mdx.ac.uk)

The item will be removed from the repository while any claim is being investigated.

See also repository copyright: re-use policy: <http://eprints.mdx.ac.uk/policies.html#copy>



## Evaluación del riesgo de inundación a múltiples componentes en la costa del Maresme

C. Ballesteros, J. A. Jiménez & C. Viavattene

To cite this article: C. Ballesteros, J. A. Jiménez & C. Viavattene (2017) Evaluación del riesgo de inundación a múltiples componentes en la costa del Maresme, Ribagua, 4:2, 110-129, DOI: [10.1080/23863781.2017.1381453](https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1381453)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1381453>



© 2017 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group on behalf of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR).



Published online: 23 Oct 2017.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 661



View Crossmark data [↗](#)

## Evaluación del riesgo de inundación a múltiples componentes en la costa del Maresme

C. Ballesteros<sup>a</sup>, J. A. Jiménez<sup>a</sup> y C. Viavattene<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, c/Jordi Girona 1-3, Campus Nord ed D1, 08034, Barcelona, España; <sup>b</sup>Flood Hazard Research Centre, Middlesex University, The Burroughs, Hendon, London, NW4 4BT, UK

### RESUMEN

La costa es una de las zonas más sometidas a riesgos naturales, siendo la inundación uno de los más frecuentes e importantes en términos de daños inducidos, por lo que cualquier esquema de gestión requiere evaluación. La inundación en zonas costeras es una amenaza natural asociada a diferentes procesos que actúan a distintas escalas: tormentas costeras, riadas y subida del nivel del mar (SNM). Para abarcar la totalidad del problema, este trabajo propone una metodología para la evaluación preliminar del riesgo integrado de inundación costera a una escala regional que permite evaluar la magnitud de cada componente teniendo en cuenta su alcance (extensión de la zona afectada) y su escala temporal. El riesgo se cuantifica en función de unos indicadores específicos que valoran la magnitud de la amenaza para cada componente y las consecuencias. Esto permite comparar robustamente la distribución espacial del riesgo a lo largo de la costa, para identificar tanto zonas de mayor riesgo como las componentes que más contribuyen al mismo. Aplicamos esta metodología a un tramo de costa característica del Mediterráneo español (Maresme, Cataluña). Los resultados permiten caracterizar esta costa como un área con un riesgo global relativamente bajo, pero algunos puntos singulares con riesgo alto.

### PALABRAS CLAVE

Inundación; tormentas; riadas; nivel del mar; riesgo; indicadores

### KEYWORDS

Flood; storms; flash floods; sea level; risk; indicators

### Flood risk evaluation to multiple components on the coast of Maresme

#### ABSTRACT

The coast is one of the areas most affected by natural hazards, with floods being the most frequent and significant of these in terms of their induced impacts, so any management scheme requires their evaluation. In coastal areas, flooding is a hazard associated with different processes acting at different scales: coastal storms, flash floods and sea level rise (SLR). To address the problem as a whole, this study presents a methodology to undertake a preliminary integrated risk assessment of the magnitude of each flood component, taking into account their scope (extension of the affected area) and their temporal scale. The risk is quantified using specific indicators to assess the hazard magnitude (for each component) and the consequences. This allows for a robust comparison of the spatial risk distribution along the coast in order to identify both the most at-risk areas and the most influential risk components. This methodology is applied to a stretch of coastline (Maresme, Catalonia) representative of the Spanish Mediterranean coast. The results obtained characterise this coastline as an area with a relatively low overall risk, although some hotspots are identified as having high-risk values.

## 1. Introducción

La zona costera es una de las áreas más amenazadas por los riesgos naturales (EEA, 2006; Kron, 2012), a la vez que concentra un elevado número de valores naturales y socioeconómicos (EEA, 2013). Esta conjunción hace que cualquier intento de gestión de dicha zona deba incluir una evaluación del riesgo costero. Un ejemplo de ello es la inclusión en el Protocolo de (Gestión Integrada de Zonas Costeras) GIZC en el Mediterráneo (PAP/RAC, 2007), de un capítulo específico sobre riesgos naturales.

Entre las principales amenazas de origen natural presentes, una de las más destacadas tanto por su frecuencia, como por su potencial de daño, es la inundación (Barnolas, 2007; Kron, 2012; Nicholls, 2004). La inundación es un proceso en el cual la tierra queda sumergida bajo una capa de agua por un determinado tiempo. En zonas costeras, esto puede ser originado por diferentes forzamientos que actúan a distintas escalas. De forma general, y a lo largo de la costa mediterránea en particular, las componentes principales están asociadas al impacto de temporales costeros, la subida del nivel del mar, y al desbordamiento de los cauces de ríos y sus

riberas durante lluvias torrenciales. Los dos primeros, aunque son de origen marino, se caracterizan por estar asociados a una diferente escala temporal (episódica y a largo plazo, respectivamente) y generar una inundación de características diferenciadas (temporal y permanente, respectivamente). La última componente es de origen terrestre, aunque dadas las características de la costa mediterránea (geomorfología y climatología), hace que en esta zona tenga una especial importancia.

Tradicionalmente, el riesgo de inundación se ha gestionado mediante infraestructuras de protección. Sin embargo, la protección absoluta puede considerarse como inalcanzable y/o insostenible, debido tanto al costo que se supondría, como a la inherente incertidumbre asociada (Schanze, 2006). Por ello, se ha producido un cambio en la política de la Unión Europea (UE o *EU en ingles*), pasando desde una perspectiva basada en la protección a las inundaciones, a una basada en la gestión del riesgo. En este contexto, la Directiva 2007/60/EC (EC, 2007) relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación insta a los estados miembros a llevar a cabo los análisis del riesgo de inundación basados en las circunstancias locales, considerando los diferentes tipos de inundación presentes (inundación de ríos o riadas, inundaciones urbanas e inundaciones de origen marino). Esto queda explícito en el Artículo 4; donde se indica que, sobre la base de información disponible en especial sobre el impacto del cambio climático en la frecuencia de inundaciones, se apunta al “realizar una evaluación preliminar del riesgo de inundación con objeto de proporcionar una evaluación del riesgo potencial”.

Por lo tanto, para gestionar de manera adecuada el riesgo de inundación costera es necesario conocer la magnitud de cada una de las componentes y sus consecuencias, tanto de forma individual como integrada, lo que representa abordar el análisis desde un punto de vista holístico.

Aunque las diferentes componentes del riesgo pueden ser evaluadas de forma detallada utilizando modelos de precisión (Penning-Rowsell et al., 2013), cuando el análisis se hace a escala regional y, sobre todo, teniendo en cuenta todas las posibles contribuciones, es muchas veces conveniente hacer una primera aproximación en la que se identifiquen las zonas de mayor riesgo. Esto permite al gestor identificar los puntos críticos en el territorio que posteriormente pueden ser analizados en detalle. Una de las ventajas de esta aproximación es que permite la evaluación de todas las componentes usando aproximaciones, las cuales no requieren un elevado número de datos, ni de la utilización de modelos avanzados.

En este contexto, el principal objetivo de este trabajo es introducir un marco de análisis para evaluar el riesgo de inundación costera con múltiples componentes a escala regional, debido a tormentas de origen

marino, tormentas de origen terrestre (riadas) y la subida del nivel del mar. El objetivo práctico es, por un lado, la identificación de las áreas críticas (*hotspots* o puntos de calor, en ingles) a lo largo del territorio y, por otro lado, evaluar la contribución relativa de cada una de las componentes del riesgo de inundación.

Este marco de análisis se aplica al litoral catalán en España como paradigma de costa desarrollada mediterránea (Brenner, Jimenez, & Sarda, 2006; Sarda, Avila, & Mora, 2005). La relevancia de un análisis de este tipo en la zona radica en que la fuerte ocupación, el desarrollo de asentamientos e infraestructuras, y el elevado uso turístico que sufre esta zona hacen que los valores expuestos al impacto de amenazas naturales (como la inundación) sean muy altos (Barnolas & Llasat, 2007; Fleta et al., 2006; Jiménez, Sancho-García, Bosom, Valdemoro, & Guillén, 2012; Llasat, Llasat-Botija, Rodríguez, & Lindberg, 2010; Llasat, Llasat-Botija, Rodríguez, & Lindbergh, 2010).

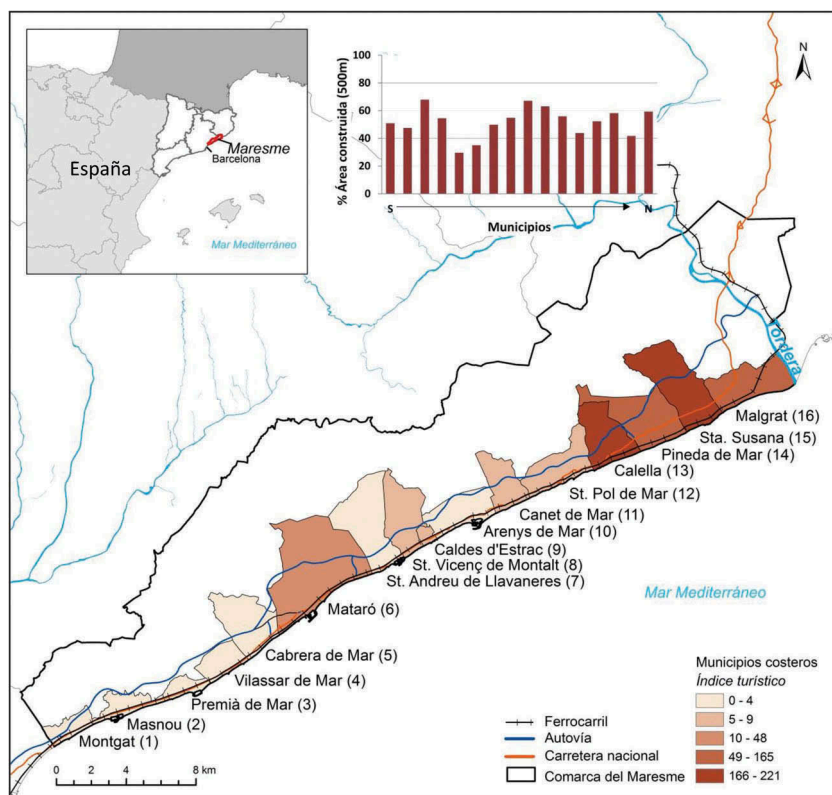
## 2. Área de estudio y datos

### 2.1. Área de estudio

La zona en la que se realiza este estudio es la costa del Maresme, que se extiende a lo largo de unos 45 km, desde Badalona al sur hasta la desembocadura del río Tordera, al norte (Figura 1). Este borde costero se caracteriza por la presencia de playas rectilíneas de arena gruesa que, si bien en su origen conformaban una costa ininterrumpida, en la actualidad se encuentra segmentada en celdas, debido a la presencia de 5 puertos. La combinación de un esquema de transporte longitudinal neto de sedimento relativamente elevado dirigido de norte a sur, junto a la presencia de estas barreras, ha generado un patrón de evolución típico en el que las playas al levante de los puertos han crecido sustancialmente, mientras que las playas al poniente prácticamente han desaparecido (Jiménez, Sancho-García, & Bosom, 2012).

A lo largo de esta costa se destaca la presencia de “rieras”. Estos cauces de ríos efímeros normalmente se encuentran secos, y, dado el carácter torrencial del clima mediterráneo, se caracterizan por la descarga episódica al mar de grandes cantidades de agua procedentes de eventos de tormenta típicos de la costa mediterránea (“gota fría”).

Desde el punto de vista administrativo, la comarca cuenta con 16 municipios costeros los cuales, debido a la cercanía del área metropolitana de Barcelona, se caracterizan por tener una elevada densidad de población (3.000 habitantes/km<sup>2</sup>) y llegando a alcanzar un máximo de 13.000 habitantes/km<sup>2</sup> en el municipio de *Premià de Mar* (3) (IDESCAT, 2013).



**Figura 1.** Área de estudio. Municipios costeros dentro de la comarca del Maresme.

Al igual que gran parte de la costa mediterránea, esta zona ha experimentado un fuerte desarrollo urbanístico asociado tanto al uso residencial como al turístico. Así, la mayor parte de los municipios tienen en los primeros 500 metros de la costa más del 50% de su superficie urbanizada (Fig.1). Este crecimiento urbanístico se ha realizado de forma diferenciada a lo largo de la comarca, debido a la influencia de importantes núcleos y conurbaciones como Barcelona, Mataró y la Costa Brava. Así, se pueden diferenciar subcomarcas que conforman dinámicas territoriales tanto físico-naturales como socioeconómicas muy diferentes. Los municipios situados más al norte se destacan por un desarrollo basado en la actividad turística. Este comportamiento queda reflejado en la Figura 1, con el “índice turístico”. Este índice, desarrollado por La Caixa, está basado en el impuesto de actividades económicas relacionadas con los establecimientos turísticos, el número de habitaciones y su ocupación anual, resultando en un buen indicador de la oferta turística municipal (La Caixa, 2013).

En la zona central, la presencia de la capital, Mataró, se ha conformado en un área más industrializada y comercial; mientras que en el sector sur, el desarrollo se ha visto fuertemente ligado al crecimiento metropolitano de Barcelona. La expansión

territorial en el tramo de costa más próximo a Barcelona ha sido influenciada por el papel que han jugado las infraestructuras de movilidad, la ocupación del suelo y el planeamiento urbanístico. Actualmente, el impacto y las repercusiones que han tenido el ferrocarril y la carretera nacional, que discurren de forma paralela a la línea de costa, han sido definitivos para la transformación urbanística en el Maresme. La proximidad al mar de estas infraestructuras ha dado lugar a que en muchos tramos de costa, ésta quede separada únicamente del mar por una escollera de protección, al haber desaparecido la playa. Esto hace que durante el impacto de temporales significativos, el servicio se pueda ver afectado por el rebase del oleaje. Otras incidencias destacables son el desbordamiento y la inundación de las rieras a la proximidad de su desembocadura, provocando entre otros, paros y fallos en el funcionamiento del tren y vías de comunicación.

Por lo tanto, atendiendo a la estrecha relación que existen entre los usos del frente costero y los procesos naturales de origen marino, se puede considerar que las playas del Maresme cumplen principalmente dos funciones básicas: la función de protección del frente costero al efecto de los temporales marinos, y la función de recreación, tanto para el uso local como para la atracción del turismo.



## 2.2. Datos

Los datos utilizados en este trabajo se pueden agrupar en aquellos referentes a la caracterización de las amenazas y aquellos para evaluar las consecuencias.

Para caracterizar la amenaza de inundación marina por tormentas, se utilizaron los datos de oleaje de la base de retroanálisis SIMAR-44, que ha sido generado a partir del modelado de alta resolución de la atmósfera, nivel del mar y oleaje realizado por Puertos del Estado, en el marco de un proyecto europeo denominado HIPOCAS (Guedes-Soares, Weisse, Carretero, & Alvarez, 2002). Los datos de oleaje utilizados cubren el periodo del 1 de Enero de 1958 al 31 de Diciembre de 2001, en forma de serie temporal del nivel de la marea meteorológica, altura significativa espectral  $H_{m0}$ , periodo medio  $T_m$ , periodo de pico  $T_p$ , y la dirección media del oleaje creada con un dato del estado del mar cada 3 horas.

Para caracterizar las amenazas de inundación por riadas, se ha utilizado el conjunto de datos de precipitación máxima diaria asociada a un período de retorno ( $Tr$ ) de 10 años (ACA, 2015). Finalmente, para caracterizar la amenaza de inundación por la subida del nivel del mar, se han considerado dos escenarios climáticos: uno dado por la proyección RCP 8.5 (Trayectorias de Concentración Representativas, en sus siglas en inglés, *Representative Concentration Pathway*) para el año 2100, dada por el AR5 (IPCC, 2015); y otro teniendo en cuenta una subida extrema de 2 m, lo que se puede considerar más bien como un escenario pesimista, pero relevante en la gestión del territorio (vea Hinkel et al.) Hinkel et al. (2015).

Para caracterizar la topografía de la zona de estudio, se utilizó un modelo digital del terreno con un tamaño de celda de 5 m x 5 m, proveniente del *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* [Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña] (ICGC, 2015). Asimismo, las características físicas del territorio utilizadas para la valoración del riesgo por inundación en riadas son dadas por el Índice de Vegetación y Tipo de Suelo, que fueron obtenidas del *USGS Land Cover Institute* [Investigación Geológica de los Estados Unidos de América, Instituto de Cobertura de Tierras] (Broxton, Zeng, Scheftic, & Troch, 2014) y del *European Soil Data Centre* (ESDAC) [Centro de estadísticas del suelo europeo] (ESDAC, 2015), respectivamente.

Los principales datos utilizados para evaluar las consecuencias de las inundaciones se determinaron a partir del Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña (MCSC), elaborado por el CREA (Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales) (Ibáñez, & Burriel, 2010). Finalmente, para valorar los aspectos sociales, se utilizó la información socio-económica disponible en el Instituto de Estadística de Cataluña (IDESCAT, 2014).

## 3. Metodología

### 3.1. Marco general

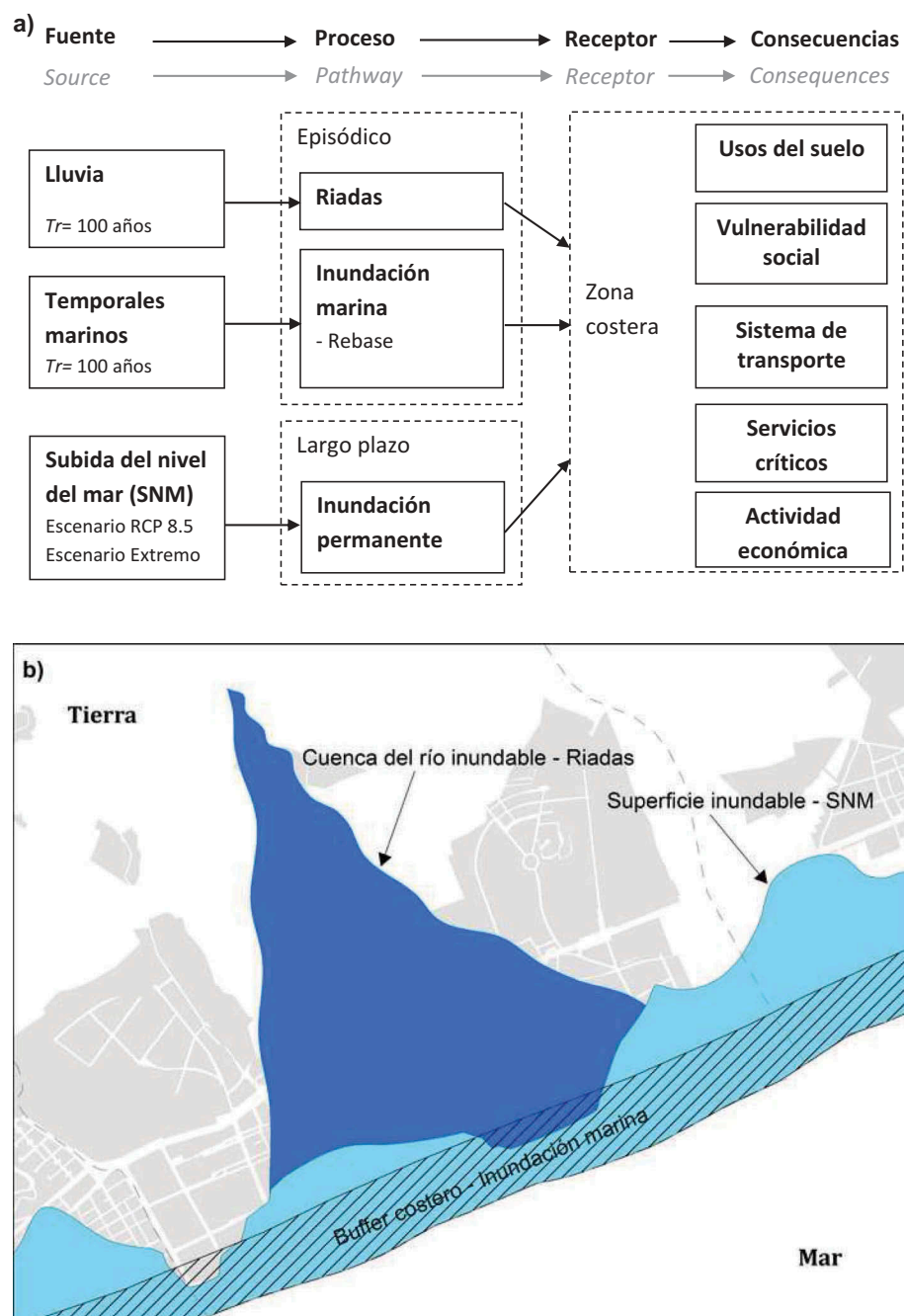
El marco de análisis adoptado para evaluar el riesgo en este trabajo es el conocido como modelo SPRC (*Source-Pathway-Receptor-Consequence* en inglés, que significa Fuente-Camino-Receptor-Consecuencia) (Fig. 2a). Este modelo SPRC fue utilizado por primera vez en ciencias naturales para el estudio de los riesgos derivados de las fugas de contaminantes tóxicos (Holdgate, 1979), siendo más adelante adaptado al análisis de riesgo de las inundaciones, ya que permite fácilmente describir como éstas se propagan desde una fuente determinada a través de una serie de pasos, a unos receptores dados (Gouldby et al., 2005). Debido a ello, el modelo SPRC ha sido aplicado en estudios de inundabilidad asociados con prácticamente todas las escalas y agentes (fuentes) posibles, utilizando diferentes aproximaciones para evaluar tanto los procesos involucrados como las consecuencias (e.g. Narayan et al.) Narayan et al. (2014). En este trabajo, el modelo SPRC es aplicado a la zona costera para analizar el riesgo de inundación considerando que éste tiene diferentes fuentes que actúan sobre el territorio, a diferentes escalas temporales y espaciales. Además, aunque el proceso final resulta en una inundación, ésta se puede verificar también a diferentes escalas y con diferentes consecuencias al tener influencia sobre partes diferenciadas del territorio (Fig. 2).

Así, las fuentes consideradas en el análisis son tres:

- (i) episodios de riadas durante eventos de gota fría,
- (ii) tormentas costeras con subida del nivel del mar debido a la presencia de olas y marea meteorológica, y
- (iii) subida del nivel del mar de origen climático.

Las dos primeras son de escala episódica y están asociadas a la presentación de eventos de naturaleza temporal, que son las de naturaleza estocástica y de duración limitada (horas-días). La tercera es una componente de largo plazo, asociada a un fenómeno climático que sólo es perceptible a períodos de tiempo muy largos (varias décadas) y con una duración permanente.

En término de *pathways* (caminos, en inglés), la primera componente se verifica desde la tierra, dado que se origina y propaga en la cuenca de drenaje de ríos existentes en la zona costera que sean susceptibles a sufrir con estos eventos. Las otras dos componentes son de origen marino y se propagan desde el mar hacia



**Figura 2.** a) Modelo Source-Pathway-Receptor-Consequence (SPRC) para inundaciones costeras b) Alcance de las componentes de inundación en la zona costera para la evaluación de las consecuencias.

el interior. La forma de propagación y afectación depende de la naturaleza de la fuente. En el caso de eventos temporales, se producen por un aumento temporal del nivel del mar, el cual es capaz de superar la cota máxima de la playa o defensa existente a lo largo de la costa durante un período de tiempo determinado. Habitualmente lleva consigo la modificación del borde costero (por erosión) en el caso de costas sedimentarias. En el caso de ser a largo plazo, la inundación que se

produce por un aumento permanente del nivel del mar, una vez que supere la cota de la playa o la defensa existente a lo largo de la costa, quedará permanentemente sumergida. Aunque también lleva consigo una respuesta en las costas sedimentarias, habitualmente se considera como un proceso de inundación pasivo.

En términos del receptor, el modelo se ha aplicado asociando un área determinada de la zona costera, a cada una de las escalas. Dadas las características de los

diferentes procesos en la costa mediterránea española, se han seleccionado las tres zonas siguientes: (i) cuenca del río inundable para el evento considerado; (ii) *buffer* costero de tormenta que viene delimitado por la zona más probable a verse afectada por las tormentas costeras características de la zona y, que en este caso se ha tomado con una anchura de 100 m; y (iii) zona inundable por SNM que queda delimitada por la zona con una elevación inferior al escenario considerado y conectada directamente al mar (ver Fig.2b).

Por último, las consecuencias de la inundación se caracterizan mediante la integración de 5 componentes, los cuales determinan la presencia de diferentes elementos en exposición, y que reflejan valores territoriales y socio-económicos de la zona costera (usos del suelo, vulnerabilidad social, sistema de transporte, servicios e infraestructuras críticas, y actividad económica) (Fig. 2a).

El modelo se aplica individualmente para cada componente y, por último, se integran los diferentes valores obtenidos para tener una valoración del riesgo global.

### 3.2. Evaluación del riesgo

A la hora de cuantificar el riesgo de inundación asociado a cada componente, se ha optado por utilizar una aproximación al valor de las amenazas y consecuencias, basada en el uso de indicadores. Dado que el principal objetivo es identificar las zonas con mayor riesgo a lo largo de la costa, así como determinar la contribución de cada una de las componentes, esto permite una valoración objetiva a la vez que simplificada de ambas componentes. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que con esta aproximación se asume que todo el valor expuesto se verá afectado por la amenaza considerada (o la componente respectiva), siendo la magnitud de ésta la que determinará el daño final, que se considera proporcional a su intensidad. Así, el riesgo absoluto,  $R_{abs}$ , asociado a la inundación a lo largo de la costa viene determinado por la ecuación 1:

$$R_{abs} = \sum_j^n (IA_j * E_j)^{1/2} * S_j \quad (1)$$

Ecuación 1 es donde  $IA$  es el indicador que mide la magnitud de la amenaza;  $E$ , es el indicador que mide el valor expuesto;  $S$  la superficie afectada; y  $j$  cada una de las  $n$  superficies en las que se ha subdividido la zona costera para su evaluación.

Con el fin de comparar espacialmente el riesgo a escala regional, se integrará el valor del riesgo para

cada amenaza a escala municipal. Esto permitirá identificar las unidades de gestión (asumiendo que el municipio es la escala mínima de gestión) más susceptibles a la inundación. Además, se ha obtenido un valor medio del riesgo por municipio para caracterizar la importancia de la inundación a lo largo de la costa, en términos unitarios (es decir, sin tener en cuenta la longitud o extensión del municipio). Este riesgo medio,  $R_{med}$ , viene dado por la ecuación 2:

$$R_{med} = \frac{\sum_j^n (IA_j * E_j)^{1/2} * S_j}{\sum_j^n nS_j} \quad (2)$$

### 3.3. Evaluación de la inundación (amenaza)

En este trabajo la magnitud de la amenaza de inundación se caracteriza de forma general como la superficie del suelo cubierta con agua, sin embargo las características específicas dependerán de la componente considerada. Así, en el caso de las componentes asociadas a la escala episódica (tormentas) esta superficie estará inundada sólo temporalmente y además, la inundación ocurrirá casi instantáneamente (lo que dure el evento). En el caso de la componente a largo plazo, la superficie inundada lo estará permanentemente y el proceso se producirá muy lentamente. En cualquier caso, la superficie afectada se tomará como variable de control para establecer la escala de la magnitud de la amenaza. Esta se establecerá de forma individualizada para cada componente, aunque usando una escala unificada del 1 al 5, donde el 5 representa la máxima intensidad o el máximo daño potencial, y el 1 representa el valor mínimo. A continuación se describe la metodología aplicada para cada componente.

#### 3.3.1. Riadas

Las riadas o inundaciones repentinas (*flash flood*, en inglés), pueden definirse como eventos extremos asociados a cortas e intensas lluvias, principalmente de origen convectivo que ocurren localmente (Marchi, Borgia, Preciso, & Gaume, 2010). En la costa mediterránea, estos eventos se caracterizan principalmente por su extrema magnitud y estacionalidad (Gaume et al., 2009); y dado el desarrollo urbano y el incremento de población que experimenta la costa durante el verano (Llasat, Llasat-Botija, & Rodriguez et al., 2010), esta zona se considera especialmente sensible.

Para analizar esta componente de la inundación, se sigue una aproximación en dos pasos: En primer lugar, se identifican las sub-cuencas más susceptibles a verse afectadas por riadas; y en segundo lugar, en aquellas



zonas críticas, se cuantifica la intensidad de la amenaza asociada a una probabilidad determinada.

Para identificar las sub-cuencas más susceptibles, se ha aplicado una versión modificada del índice *FFPI* (*Flash Flood Potential Index*, que en inglés significa el chance de tener una inundación muy rápida o riada). Este índice combina las diferentes características fisiográficas con una fuerte influencia en la respuesta hidrológica de las cuencas; y por tanto, en el potencial de riadas. Este índice fue desarrollado originalmente por Smith (Smith, 2003), e incluye información sobre la pendiente del terreno (*M*), los usos del suelo (*L*), el tipo de suelo (*S*) y la vegetación (*V*) a lo largo de la cuenca.

Con el fin de incluir también información sobre el régimen climático, este índice ha sido modificado, incluyendo información de la climatología local como una variable relevante para el fenómeno analizado. A tal fin, se ha seleccionado la precipitación máxima diaria asociada a un período de retorno dado (*R*) (Jiménez, 2015). La fórmula del índice modificado, *FFPI'* (Ecuación 3), queda como:

$$FFPI' = \frac{M + L + S + V + R}{5} \quad (3)$$

Para combinar los diferentes factores, los valores asociados a cada uno de ellos fueron clasificados en una misma escala del 1 al 10, en consideración a su respuesta hidrológica como criterio, según establece Ceru (Ceru, 2012). El índice se calcula a partir de información en un formato *raster*, es decir, el territorio queda dividido en una malla, donde cada celda dispone de los datos mencionados anteriormente. Una vez que se haya calculado el valor en cada celda, se integran los valores asociados a cada cuenca y/o sub-cuenca hidrográfica. Los valores resultantes se reclasifican según una escala de 5 categorías que permitirá identificar aquellas partes del territorio más susceptibles de sufrir riadas.

Una vez identificadas las zonas más sensibles, la segunda fase consistió en cuantificar en detalle la inundación en dichas zonas. Para ello, se aplica un análisis estándar de inundabilidad en ríos, donde se evalúa para un evento asociado a una probabilidad dada (*Tr* = 100 años) que la zona quede afectada y la altura de la capa de agua quede así, respectivamente.

Para el caso del Maresme, se ha utilizado el análisis realizado por la Agencia Catalana del Agua (ACA) para la implementación de la Directiva Europea de Inundaciones (2007/60/EC) (EC, 2007). Este se obtuvo mediante la aplicación del modelo HEC-HMS para el análisis hidrológico, seguido de la aplicación del modelo Guad2D para el modelado hidráulico (ACA, 2015).

Para asociar una escala de intensidades a la amenaza, se ha aplicado el concepto de curvas de daños, en las cuales se asocia a una profundidad determinada de la inundación al daño esperable. En nuestro caso, se han utilizado las curvas propuestas por Velasco et al. (Velasco, Cabello, & Russo, 2015), obtenidas para la ciudad de Barcelona para establecer dicha escala. Desde el punto de vista práctico, a cada superficie con un intervalo de profundidad dado, se le asigna el valor de intensidad correspondiente (Tabla 1).

### 3.3.2. Inundación marina por temporales

Esta componente valora la inundación temporal de la zona costera bajo la influencia de tormentas de origen marino. En este caso, el agente forzador es el ascenso temporal del nivel del mar durante la tormenta, asociado tanto al rebase del oleaje como a la presencia de una marea meteorológica.

La intensidad de esta componente a lo largo de la costa se ha evaluado estimando la extensión de la zona inundable en sectores de 1 km de longitud asociada a una probabilidad determinada. En primer lugar, se obtuvo a lo largo de 46 sectores la distribución extrema del nivel del mar, donde el remonte se calculó utilizando el modelo de Stockdon et al. (Stockdon, Holman, Howd, & Sallenger, 2006), tanto cuando la costa estaba formada por playa y mediante el modelo de Pullen et al. (Pullen et al., 2007) cuando el borde costero estaba formado por un talud de escollera.

A partir de ese punto, para el periodo de retorno seleccionado (*Tr* = 100 años) se estimó la extensión de la inundación en cada sector, utilizando un perfil representativo para ello. Dadas las características de la zona costera, este se hizo aplicando el método *bathtub* (tina de baño, en inglés), en el que se asume que las áreas hidráulicamente conectadas con el mar y por debajo de determinada altura quedarán inundadas (Gallien, Schubert, & Sanders, 2011; Poulter & Halpin, 2008). Posteriormente, las zonas inundadas se clasifican en una escala de intensidad el cual es definida en función de la extensión de la misma (ver Tabla 1).

**Tabla 1.** Componente de la inundación y escala de la intensidad de la amenaza.

Riadas	Inundación marina	Subida del nivel del mar (SNM)	
Profundidad (m)	Extensión (m)	Tiempo de inundación (años)	Intensidad de la amenaza (IA)
<0.15	≤50% ancho playa	>2100	0
0.15-0.3	≤100% ancho playa	2080-2100	1
0.3-0.5	≤ancho playa +20 m	2060-2080	2
0.5-1.0	≤ancho playa +40 m	2040-2060	3
1.0-2.0	≤ancho playa +60 m	2020-2040	4
>2.0	>ancho playa +60 m	2020	5

### 3.3.3. Inundación por la subida del nivel del mar

La componente de subida del nivel del mar (SNM) valora la inundación de la zona costera debido al aumento del nivel del mar a largo plazo, asociado generalmente al cambio climático. La característica principal de esta componente es que la inundación del territorio es permanente y además, que ésta tiende a tomar lugar a baja velocidad.

A la hora de establecer la escala de intensidad asociada, se ha optado por definir un criterio basado en la variable del tiempo de inundación. La hipótesis asumida es que la inundación por SNM afecta de forma definitiva al territorio inundado, y que el daño esperable será proporcional al tiempo que permanece inundado o a la rapidez en que este se inunda. Implícitamente se asume que las zonas más bajas y próximas a la costa, que son las que se inundarán antes, tienen muy poca capacidad de adaptación y en consecuencia, los daños serán mayores. Por el contrario, para las zonas más altas, que estarán menos tiempo inundadas y tardarán más en llegar a inundarse, se dispondrá de un cierto tiempo para adaptarse y, por lo tanto, se asume que los daños potenciales serán menores.

La escala de intensidad se ha definido en base a períodos de 20 años, hasta el año 2100. De esta manera, a la superficie inundable en el primer período de tiempo (hasta el año 2020) se le asigna un valor de 5 y así sucesivamente (ver [Tabla 1](#)).

Como puede deducirse, el haber escogido el tiempo como variable, hace que la cota que delimita esta superficie varíe en función del escenario de SNM analizado. En este trabajo se seleccionan dos escenarios, el RCP 8.5 y uno extremo de 2m.

Para el cálculo de la superficie inundada bajo cada proyección del nivel del mar se aplicó el modelo *bath-tub*, en el que se inunda toda la superficie de tierra que esté situada por debajo de la cota de interés y conectada hidráulicamente con el mar (Gallien, Schubert, & Sanders, 2011; Poulter & Halpin, 2008).

### 3.4. Evaluación de las consecuencias

A la hora de valorar el daño ocasionado por la inundación, se puede distinguir entre los daños causados por el contacto directo con el receptor y los daños indirectos o secundarios, relacionados con la interrupción de los vínculos físicos y económicos. Los métodos de valoración existentes varían en función de si el daño dado es tangible, es decir, se le puede asignar un valor monetario, o si se trata de bienes intangibles, los cuales no se negocian en el mercado (Green, Viavattene, & Thompson, 2011; Messner et al., 2007).

Por ello, al igual que existen diferentes receptores (propiedades, personas, ecosistemas, etc.), existen diferentes métodos y unidades para su evaluación.

Como se ha mencionado anteriormente, en este trabajo se considera que las posibles consecuencias socio-económicas de la inundación costera están representadas por las componentes de: usos del suelo, vulnerabilidad social, sistemas de transporte, servicios e infraestructuras críticas, y la actividad económica. Asimismo, como ya se introdujo en la sección 3.2, la evaluación del valor de cada una de ellas se hace a través de un indicador que caracteriza su magnitud en una escala de 1 a 5, donde el 1 representa el valor expuesto más bajo de la componente considerada y el 5, el valor más alto (ver el Apéndice). Hay que considerar que en este análisis, las consecuencias son caracterizadas a través del valor de la importancia del elemento expuesto, sin considerar su vulnerabilidad ante la amenaza ya que en esencia equivaldría a considerar el máximo daño posible como la primera jerarquización espacial del riesgo de inundación a escala regional. Así pues, para un valor expuesto dado, serán las variaciones en la intensidad de la amenaza las que determinarán la variabilidad en el valor del riesgo final.

El valor total expuesto de un tramo de costa viene dado por el índice de exposición total  $e_T$ , que resulta de la agregación de los cinco indicadores mediante la siguiente ecuación, ecuación 4 (Viavattene et al., 2015):

$$e_T = [(e_{US} * e_{VS} * e_{ST} * e_S * e_{AE})]^{1/5} \quad (4)$$

A la hora de valorar cada uno de los indicadores, la superficie donde se calcula su valor depende de la componente de la amenaza evaluada. En el caso de riadas e inundación debido a SNM, se han considerado los valores de exposición presentes dentro de la superficie de inundación. En el caso de una inundación marina, los valores expuestos se han calculado considerando una zona *buffer* de 100 m a lo largo de la costa, región considerada como el área de influencia máxima de alcance de la inundación. La dimensión del *buffer* ha sido escogida dadas las características de este proceso en la costa del Maresme, por lo que debería ser adaptada en función de la zona a analizar.

#### 3.4.1. Usos del suelo

Esta componente de uso del suelo ( $e_{US}$ ) valora, de forma integrada, las propiedades de la superficie inundada, teniendo en cuenta su tipología y su uso. Para ello, se utiliza el Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña (MCSC) (Ibáñez & Burriel, 2010), reclasificándose los usos del suelo más

representativos del área de estudio en 10 clases (ver el Apéndice). A cada clase se le ha asignado un valor del 1 al 5, en función del nivel de importancia considerado en el análisis. La asignación de estos valores implica un cierto grado de subjetividad, y estos deberían ser establecidos en función de la orientación del análisis. En este trabajo se adopta una visión antropocéntrica, por lo que se han asignado los valores más altos a aquellos usos del suelo que, de verse afectados, impliquen pérdidas económicas potencialmente significativas (ver Apéndice).

### 3.4.2. Vulnerabilidad social

Esta componente de vulnerabilidad social ( $e_{VS}$ ) valora los impactos intangibles a la población afectada por la inundación, a través del Índice de Vulnerabilidad Social (SVI). Este índice representa la vulnerabilidad de las diferentes comunidades a las inundaciones y considera tanto los efectos sobre la salud a largo plazo como la recuperación financiera (Viavattene et al., 2015). Este índice fue desarrollado para el análisis de las inundaciones sobre la población en Inglaterra (Tapsell, Penning-Rowsell, Tunstall, & Wilson, 2002), y dada la escasez de propuestas específicas para el Mediterráneo, se asume su validez para la zona.

Entre las variables sociales, se tienen en cuenta los enfermos de larga duración ( $a$ ), las familias monoparentales ( $b$ ) y las personas mayores ( $c$ ). Para caracterizar la vulnerabilidad económica de la población, se incluyen el desempleo ( $d$ ), el número de hogares con un elevado número de personas ( $f$ ), el no disponer de coche ( $g$ ) y el no ser propietario de la vivienda ( $h$ ). Una vez que se tiene el valor porcentual de estas variables para la zona afectada y tras su normalización, el valor final del Índice de Vulnerabilidad Social viene dado por la ecuación 5:

$$e_{VS} = a + b + c + ((d + f + g + h) * 0.25) \quad (5)$$

En esta aplicación para el Maresme, considerando que se trata de un estudio regional y dadas las pequeñas dimensiones de los municipios en términos de asentamientos humanos, los datos utilizados están agregados a nivel municipal (IDESCAT, 2013), por lo que éste será el nivel de detalle de los valores del  $e_{VS}$ . Así, a cualquier tramo de costa dentro del municipio se le asigna un mismo valor de vulnerabilidad social. Una vez que se obtuvieron los valores de  $e_{VS}$  para cada municipio, estos se reclasificaron en una escala del 1 al 5, utilizando el método de *natural breaks* (roturas o espacios naturales, en inglés).

### 3.4.3. Sistema de transporte

Otro elemento clave para evaluar las consecuencias de las inundaciones costeras es el sistema de transporte ( $e_{ST}$ ). De acuerdo con los análisis realizados en la zona (Llasat, Llasat-Botija, & López, 2009), los daños causados por las inundaciones en los sistemas de transporte pueden ser especialmente importantes, dado que afectan a la conexión de Barcelona con las ciudades suburbanas dormitorio.

Para obtener un indicador representativo de este valor expuesto, se han considerado dos criterios: El primero, considerando los metros lineales de ferrocarril y carretera dentro de la zona de inundación (por riadas y SNM) y luego clasificándolo en una de 5 categorías, según el total de metros afectados (ver Apéndice). El segundo criterio, considerando la presencia o ausencia de diferentes sistemas de transporte a lo largo de la zona *buffer* de inundación marina y luego clasificándolo teniendo en cuenta su importancia relativa al sistema general y los posibles impactos sistémicos derivados de su interrupción (ver Apéndice).

### 3.4.4. Servicios e infraestructuras críticas

La componente de servicios e infraestructuras críticas ( $e_S$ ) valora la afectación de servicios e infraestructuras críticas por la inundación, cuya parada o cese de funcionamiento pueda implicar graves consecuencias para la comunidad, tanto dentro como fuera del área afectada. La presencia de servicios e infraestructuras críticas en la zona afectada por la inundación se ha identificado a través de los usos del suelo. Una vez identificados, estos fueron clasificados en una escala de 1 a 5, en función de su importancia relativa a diferentes niveles espaciales de la comunidad (ver Apéndice).

### 3.4.5. Actividad económica

Finalmente, para evaluar las consecuencias de las inundaciones sobre la actividad económica ( $e_{AE}$ ), ésta ha sido caracterizada a través de las principales actividades de la zona, como son la actividad turística y la industrial.

Para representar la importancia de la economía asociada al turismo, se ha utilizado el índice turístico desarrollado por la Caixa. Este índice se obtiene en función del impuesto de actividades económicas correspondiente a las actividades turísticas, referidas a establecimientos turísticos, el número de habitaciones y su ocupación anual (La Caixa, 2013).

Adicionalmente, dadas las características del área de estudio, sobre todo cuando la inundación es de origen terrestre y afecta la zona interior, hacen considerar que ésta puede ocasionar daños sobre núcleos industriales importantes. En este caso, y de forma análoga al anterior, se consideró el índice industrial desarrollado por

la Caixa y que fué elaborada en función del impuesto de actividades económicas correspondiente a las actividades industriales, y que refleja el peso relativo de la industria de cada municipio respecto al total de España (La Caixa, 2013). Ambos índices fueron evaluados a nivel municipal y reclasificados en 5 categorías, considerando el método conocido como *equal interval* (intervalo igual, en inglés).

## 4. Resultados

### 4.1. Riadas

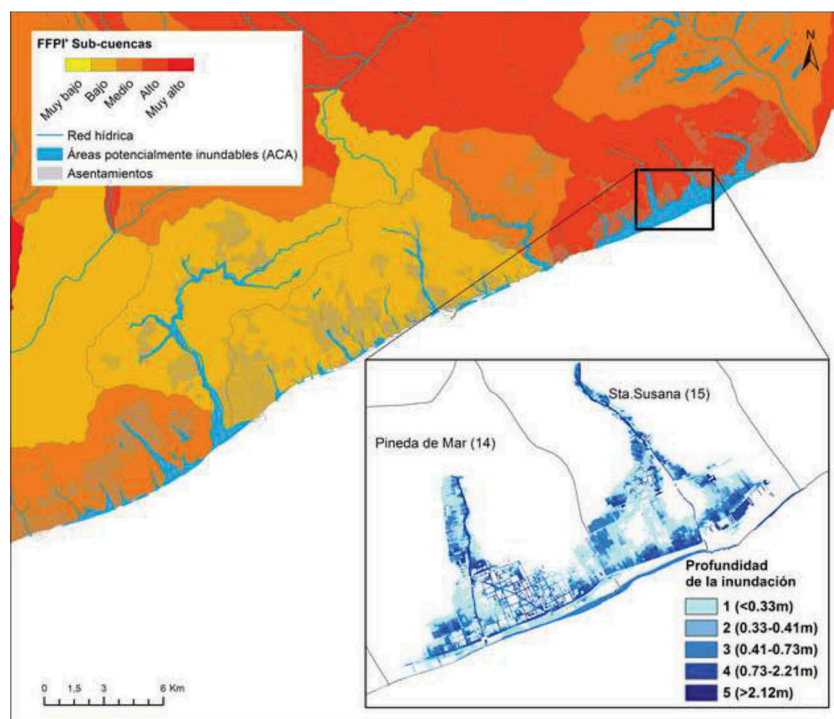
La Figura 3 muestra los resultados obtenidos para el *FFPI'* a lo largo de la costa del Maresme, integrados a nivel de sub-cuenca. Como puede verse, aunque todo el área del Maresme está surcado por rieras, el grado de susceptibilidad a sufrir riadas es variable, permitiendo así con este indicador la identificación de las zonas de mayor amenaza.

En la Figura 3 también se han representado las áreas potenciales a sufrir inundaciones, identificadas por la Agencia Catalana del Agua (ACA) durante la implementación de la Directiva Europea de Inundaciones (2007/60/EC) (EC, 2007). Estas áreas fueron identificadas a través de estudios geomorfológicos basados en la interpretación visual del

terreno (topografía y morfología), fotografías aéreas y estudios de campo. Del análisis comparativo de los datos, observamos que existe una fuerte correlación entre los valores altos obtenidos para el *FFPI'* y las áreas potencialmente inundables determinadas por el ACA, lo cual sirve de validación del índice *FFPI'* para la identificación de áreas potencialmente susceptibles a sufrir riadas.

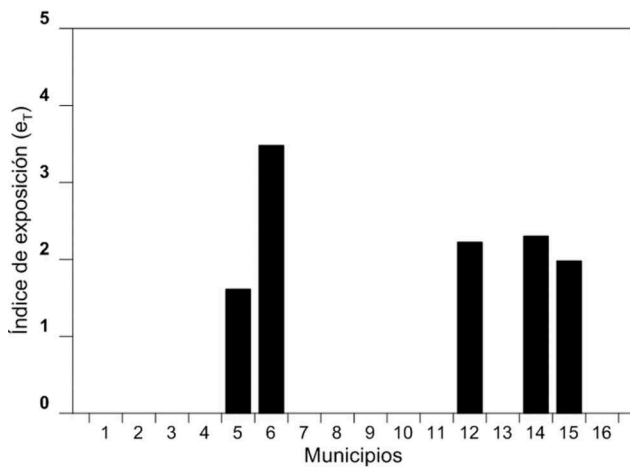
Entre las áreas identificadas como potencialmente más susceptibles, se consideraron 5 municipios para un análisis en detalle de la amenaza de inundación por riadas. En la Figura 3 se muestra como ejemplo la intensidad de la amenaza, en términos de superficie inundada y profundidad de la inundación, para un período de retorno de 100 años para los municipios de Pineda de Mar (14) y Santa Susana (15), obtenida por el ACA en 2014 (ACA, 2015) a través de un estudio hidrológico e hidráulico.

En la Figura 4 se presentan los valores del índice de exposición total. Aunque los valores de exposición pueden considerarse relativamente bajos, se destaca el municipio de Mataró (6), el cual tiene valores de exposición relativamente altos ya que en él se han categorizado elementos de gran valor, que de verse afectados, reportarían grandes pérdidas (por ejemplo: la vía del tren, carretera, industrias, y planta de tratamiento de aguas residuales).

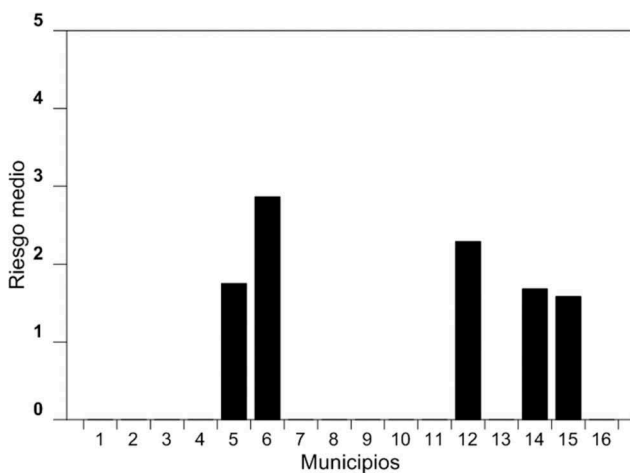


**Figura 3.** Cuencas susceptibles a sufrir riadas determinadas por el índice modificado *Flash Flood Potential Index (FFPI')*. Intensidad de la amenaza de inundación por riadas para  $Tr = 100$  años.





**Figura 4.** Valores del índice de exposición a riadas en los municipios costeros del Maresme (ver los municipios en la Fig.1).



**Figura 5.** Riesgo medio debido a riadas para  $Tr = 100$  años en los municipios costeros del Maresme (ver los municipios en la Fig.1).

En la Figura 5 se observa que los municipios de Mataró (6) y Sant Pol del Mar (12) representan un mayor riesgo medio, debido a que las riadas llegan a alcanzar valores entre 2 y 3.

#### 4.2. Inundación marina

La intensidad de la amenaza de inundación marina se presenta en la Figura 6 para dos escalas espaciales diferentes:

- (i) para cada uno de los 46 sectores de 1 km considerados a lo largo de la costa, e
- (ii) integrados a nivel municipal.

Los resultados muestran que el área de estudio es una zona de bajo riesgo excepto en unos pocos sectores donde la intensidad de la amenaza es alta, debido a la combinación de los altos valores de remonte y las cotas relativamente bajas. Estos sectores representan por lo tanto, las áreas más susceptibles a verse afectadas por el rebase debido a temporales marinos. Dada la poca extensión de estos sectores, cuando son integrados a nivel municipal, el valor total oculta su existencia.

En la Figura 7 se ha representado el valor de cada uno de los indicadores de exposición a nivel municipal, así como el valor integrado a efectos de esta componente de la inundación. Hay variaciones significativas de los valores de los indicadores: entre municipios se observan para el indicador de vulnerabilidad social ( $e_{VS}$ ), así como en la actividad económica (turismo) ( $e_{AE}$ ). Sin embargo, una vez integrados, el valor expuesto es relativamente homogéneo a lo largo de la costa.

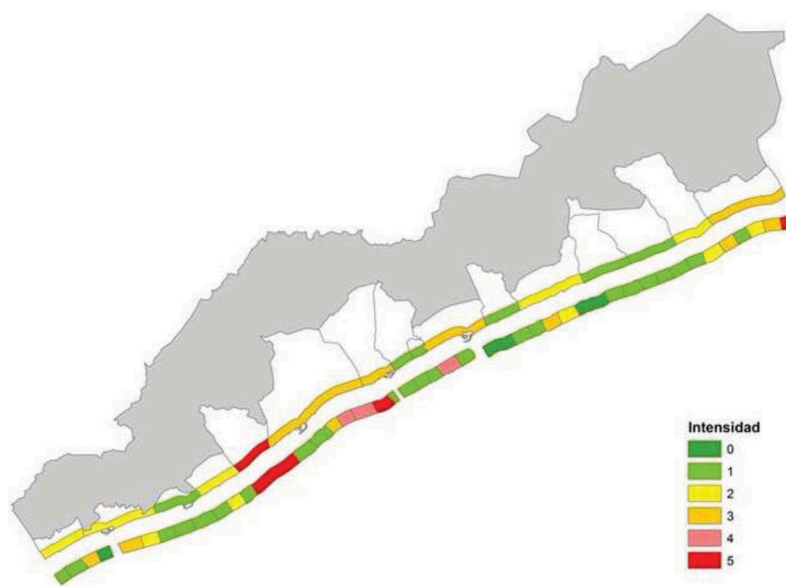
El riesgo medio de inundación marina se presenta en la Figura 8. Los resultados indican que aunque el riesgo a lo largo de la costa en general es bajo, serán principalmente en los municipios de Cabrera de Mar (5) Mataró (6) y Malgrat de Mar (16), donde esta componente de inundación marina implicará un mayor riesgo medio.

#### 4.3. Inundación por SNM

Los resultados de la inundación costera debida a la SNM para la costa del Maresme (Fig.9) indican que, aunque la superficie relativa afectada para los años presentes es pequeña, la intensidad de la amenaza es muy alta, ya que a corto plazo, la poca adaptación del territorio implica daños mayores. Sin embargo, aunque la intensidad de la amenaza es menor para los años futuros, y dado que el daño disminuirá según el territorio, se ha adaptado a la futura inundación, ya que la superficie de inundación total afectada es mucho mayor, sobre todo cuando se considera un escenario extremo.

Cuando comparamos la superficie total inundada a nivel municipal (Fig.10) considerando el escenario RCP8.5, observamos una distribución bastante homogénea a lo largo de la costa, destacándose los valores en el municipio de Malgrat de Mar (16) y con menor media, Mataró (6) y Premià de Mar (2). Este patrón a lo largo de la costa se repite, pero con valores más elevados, cuando el escenario considerado es uno extremo. En ese caso, el municipio de Malgrat de Mar (16) experimenta un aumento muy significativo de la





**Figura 6.** Intensidad de la amenaza de inundación marina para  $Tr = 100$  años, en sectores de 1km e integrados, para los municipios costeros del Maresme (ver municipios en la Fig.1).

superficie total inundada, debido a que incluye parte del Delta del Tordera, que es el área más baja de toda la comarca y por ello, la más afectada por un aumento grande del nivel del mar.

En la Figura 11 se puede observar el índice de exposición al SNM, donde al igual que en las amenazas anteriores, los valores puede considerarse bajos. Esto se debe a que el principal uso expuesto es, en muchos casos, únicamente la playa, dada la poca extensión de inundación que implica la SNM.

En la Figura 12 se presenta el riesgo medio de inundación por SNM, donde puede verse una distribución muy homogénea del riesgo a lo largo de la costa.

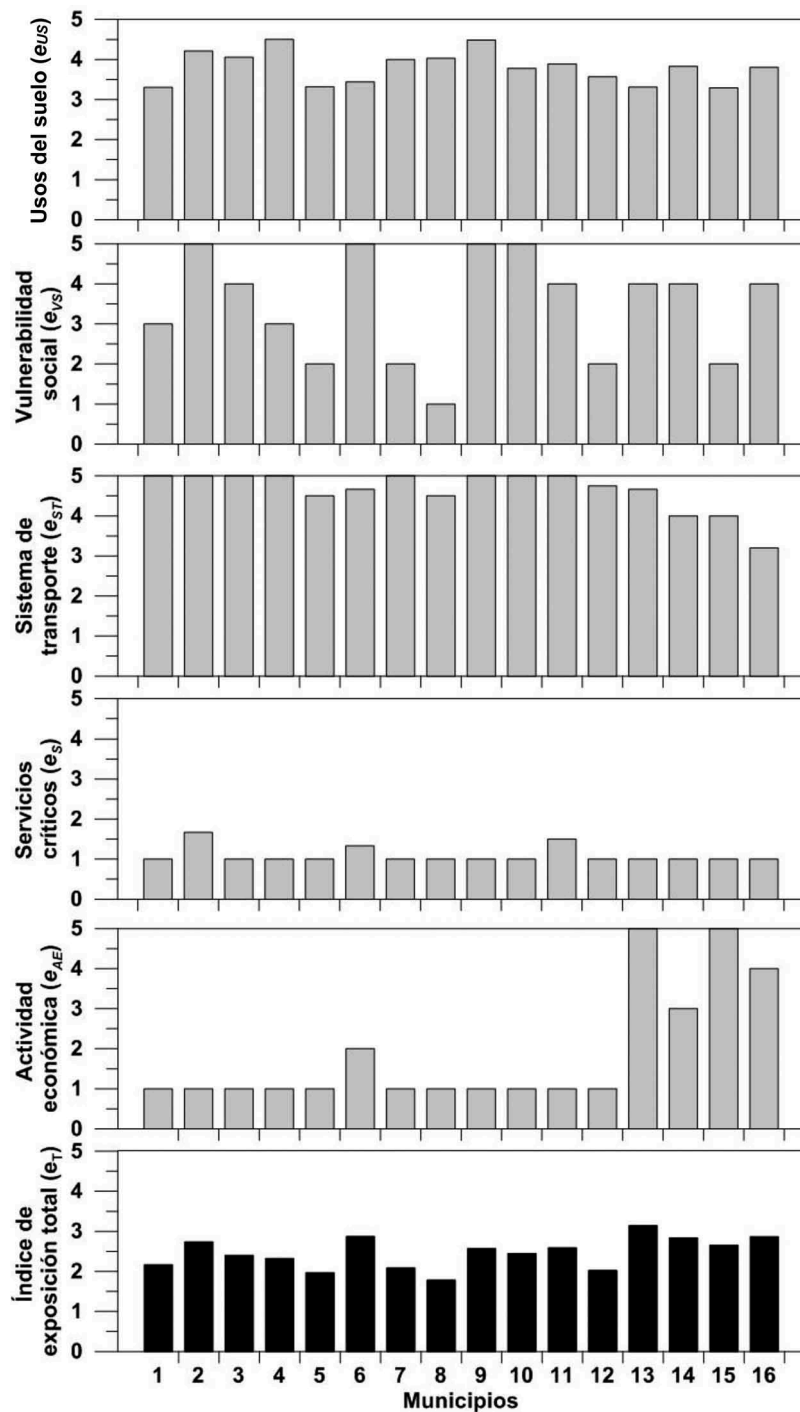
Adicionalmente a esta inundación directa, la SNM afectará la inundabilidad de la costa durante temporales. Así, incluso en situaciones de estacionalidad en el clima de temporales, una subida del nivel del mar implica que en términos relativos, el nivel de acción de las olas durante los temporales será mayor que en la situación actual. Este efecto puede verse compensado en costas sedimentarias por una respuesta de la costa ante las nuevas condiciones (e.g. Bruun, 1962; Le Cozannet, Garcin, Yates, Idier, & Meyssignac, 2014), siempre que haya suficiente espacio de acomodación. Siendo así, la variación en inundabilidad por tormentas sería relativamente pequeña, excepto en el caso de subidas dramáticas del nivel del mar que ocasionarían una respuesta costera extrema.

Sin embargo, en el caso de tramos de costa rígidos y sin capacidad de respuesta, como es el caso de algunas zonas del Maresme con un revestimiento de escollera que protege la vía del tren, la SNM sí que supone un cambio en la inundabilidad por tormentas. Para dar un ejemplo de la magnitud de esta posible interacción, la Figura 13 muestra la variabilidad en la probabilidad anual de rebase en el tramo de costa aguas abajo del Port de Mataró, en función de la SNM. Como puede verse, a medida que aumenta el nivel del mar, la probabilidad de rebase aumenta significativamente, lo que se traduciría en un aumento significativo del riesgo, en términos de afectación al transporte.

La otra variación inducida por la SNM ocurriría en zonas con playas estrechas y poca capacidad de acomodación, donde el retroceso inducido se traduciría también en una disminución relativa de la cota de la playa, con respecto al nivel medio del mar. En estas zonas, se produciría también un aumento potencial en la inundabilidad, sobre todo bajo escenarios con números altos (e.g. Bosom) Bosom (2014).

#### 4.4. Integración del riesgo

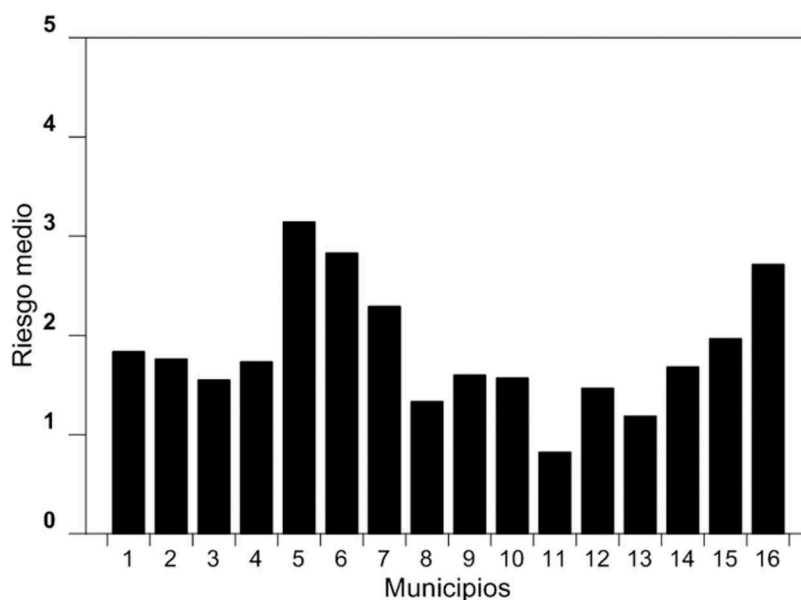
En la Figura 14 se presenta de forma integrada el riesgo de inundación a lo largo de la costa del Maresme. Cuando se compara el riesgo medio



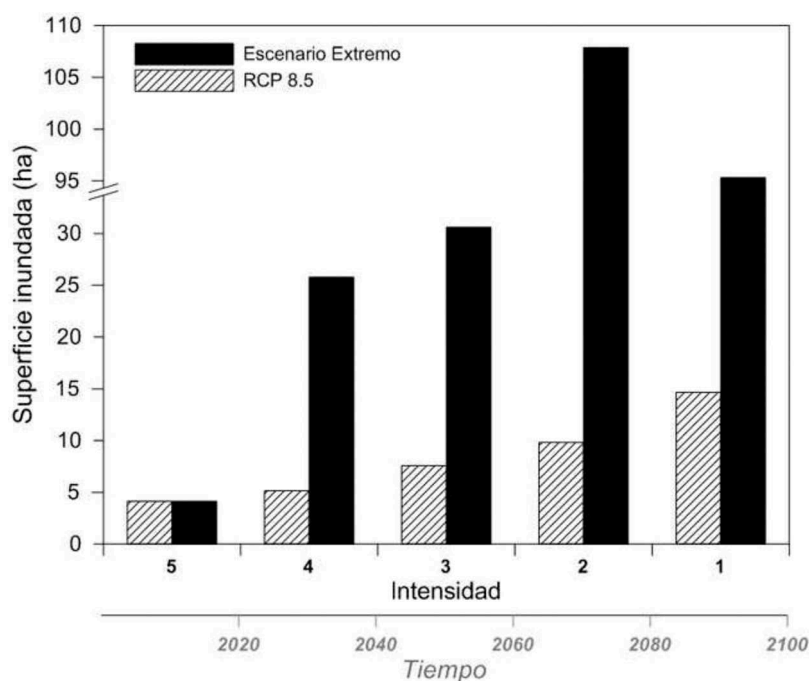
**Figura 7.** Indicadores de exposición a la inundación marina e índice de exposición total (zona *buffer* de 100 m) en los municipios costeros del Maresme (ver municipios en la Fig.1).

asociado a cada componente a lo largo del territorio, puede verse como sus magnitudes son similares, sin destacarse de forma generalizada ninguna componente, salvo las singularidades locales. Este patrón espacial tiende a mostrar una cierta homogeneidad espacial a lo largo del Maresme, tanto en las características de los valores expuestos como en la

intensidad de los procesos dinámicos que actúen. Cuando estos valores medios se integran a nivel espacial, se aprecian claramente las singularidades del territorio. Así, se observa que aunque los valores del riesgo medio asociado a riadas son similares al de las otras componentes, cuando se considera su extensión espacial, su valor es significativamente



**Figura 8.** Riesgo medio de inundación marina para  $Tr = 100$  años en los municipios costeros del Maresme (ver municipios en la Fig.1).



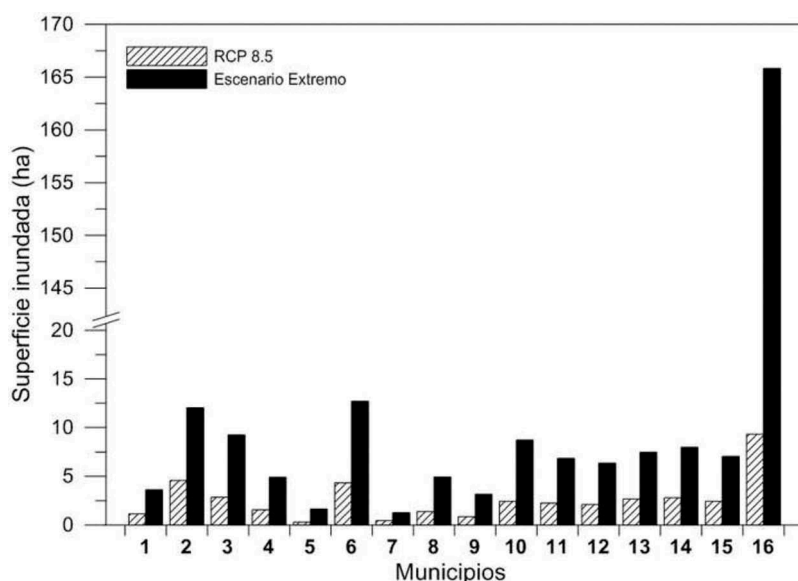
**Figura 9.** Intensidad de la amenaza de inundación por la subida del nivel del mar (SNM) en la costa del Maresme.

mayor, sobre todo en los municipios de Pineda de Mar (14) y Sta. Susana (15). En cualquier caso, en todos los municipios donde se han detectado la existencia de un riesgo significativo a las riadas, su valor integrado excede al de las otras componentes.

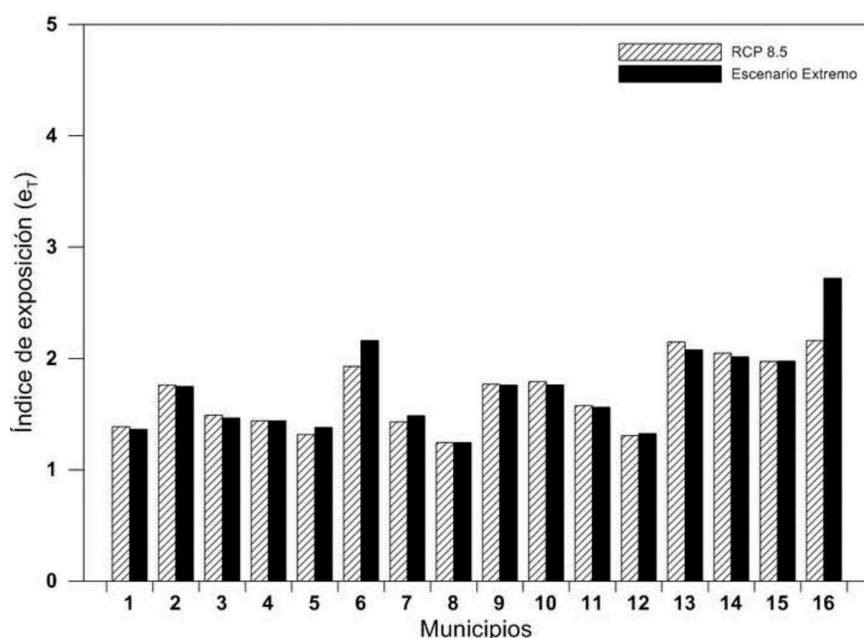
En cuanto a la SNM, el riesgo total es bajo, a excepción del obtenido para el escenario extremo en Malgrat de Mar (16). Puede verse que esta zona se comporta como una singularidad, debido a la gran

extensión de la zona inundable en el Delta del Tordera. En este municipio, esta componente domina claramente sobre las otras.

Finalmente, con respecto al riesgo total por inundación marina, los valores obtenidos son uniformes a lo largo de toda la costa y con valores absolutos pequeños, no siendo claramente dominantes en ningún municipio en particular. Sin embargo, para poner en contexto el patrón, hay que tener en cuenta



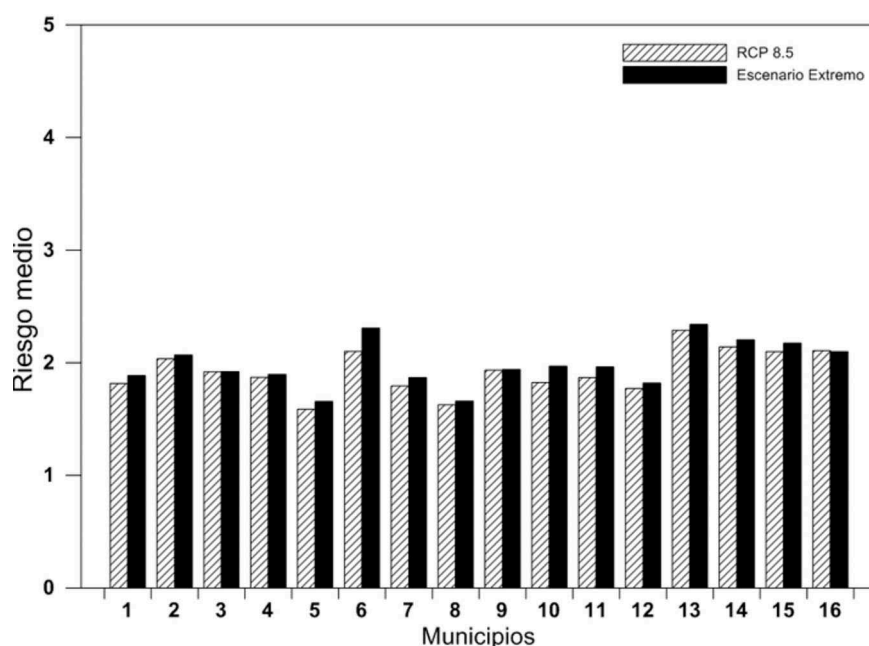
**Figura 10.** Superficie inundada por diferentes escenarios de subida del nivel del mar (SNM) para el 2100, en los municipios costeros del Maresme (ver los municipios en la Fig.1).



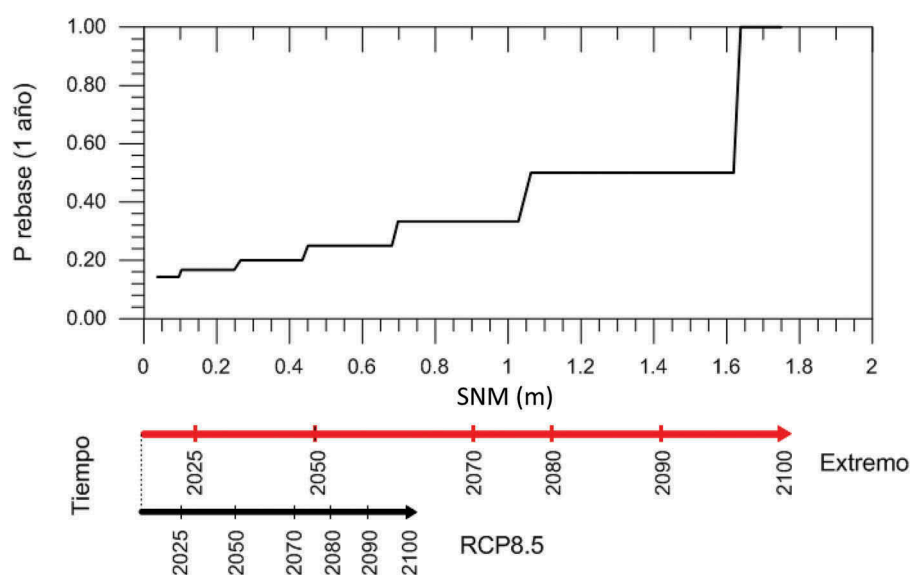
**Figura 11.** Valores del índice de exposición por subida del nivel del mar (SNM) en los municipios costeros del Maresme (ver Fig.1).

que los valores han sido integrados a nivel municipal y que a nivel local, existen tramos de costa donde el valor del riesgo por inundación asociado a tormentas costeras es significativamente alto (Fig.6). Además, aunque como se ha mencionado anteriormente que la SNM afectaría la inundabilidad por temporales y, potencialmente al riesgo inducido, dando en esta aproximación el riesgo asociado a temporales, se caracteriza a partir de una probabilidad única ( $Tr = 100$  años) y no como

la suma de todas las probabilidades: la variación producida es prácticamente despreciable. En las zonas con alto riesgo en sus condiciones actuales, el valor calculado ya está en el rango máximo y, en las zonas con poca inundabilidad, la existencia de playas anchas con capacidad de acomodación permiten mantener los niveles actuales. Sin embargo, si se considerasen otros períodos de retorno, el valor integrado si podría verse afectado.



**Figura 12.** Riesgo medio debido a la subida del nivel del mar (SNM) en los municipios costeros del Maresme (ver municipios en la Fig.1).



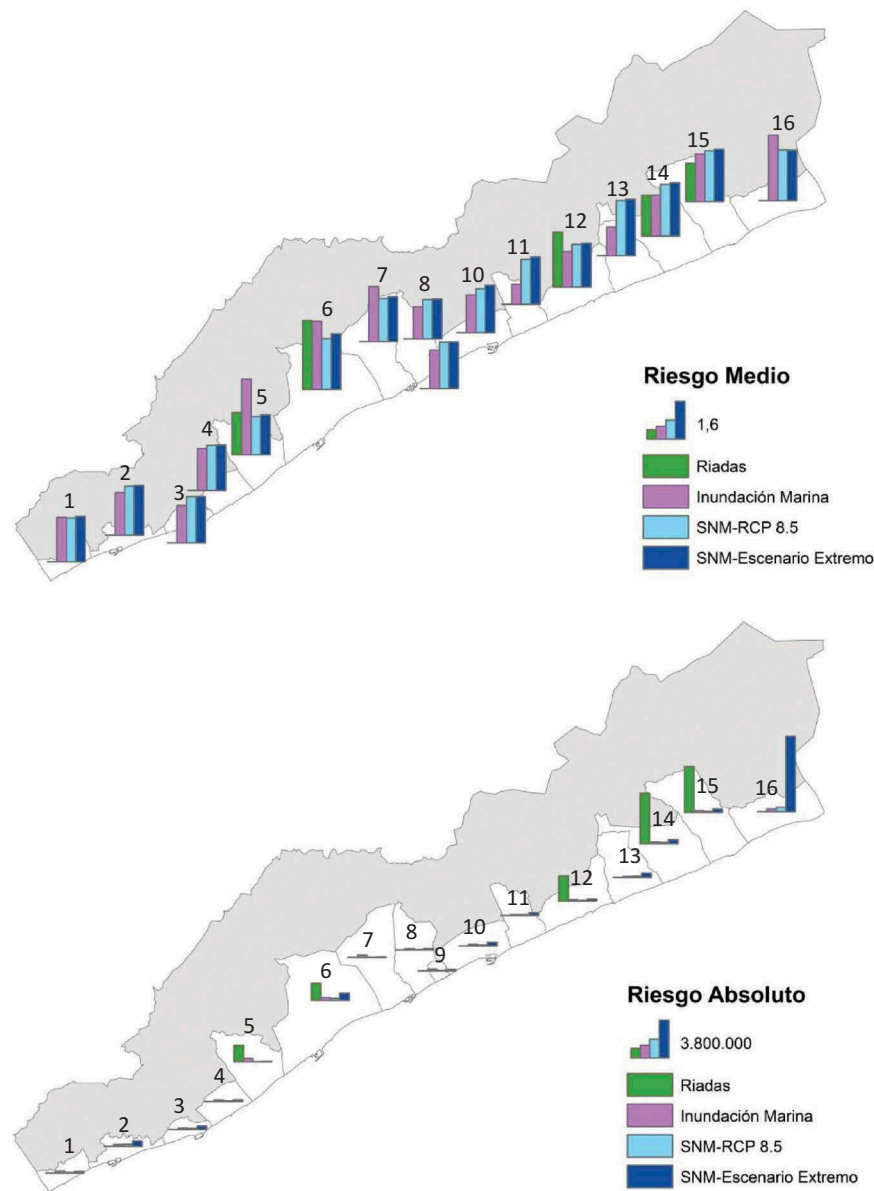
**Figura 13.** Variación de la probabilidad anual de rebalse de la escollera de protección de la vía del tren en el tramo de costa con aguas abajo del Port [Puerto] de Mataró, en función de la subida del nivel del mar. Las dos escalas temporales indican cuando se verificaría el nivel de mar respectivo bajo cada escenario (RCP8.5 y al extremo).

## 5. Discusión y conclusiones

En este trabajo se ha presentado un análisis del riesgo de inundación de la costa a nivel regional y a través de la integración, mediante indicadores, de las componentes del riesgo considerando tanto las diferentes amenazas de inundación presentes, como las diferentes consecuencias posibles. Sin embargo, hay que tener en cuenta que aunque esta metodología permite comparar, en términos de riesgo, la importancia relativa de cada una

de las componentes a nivel municipal, éstas no son directamente comparables en términos absolutos, debido a los diferentes criterios considerados. Así, la intensidad de las componentes con una escala episódica se ha basado en la extensión de la zona afectada asociada a una probabilidad, mientras que la componente a largo plazo se ha basado en el tiempo de afectación. Esto hace que, aunque se utilice una misma escala de intensidad aplicada a una misma escala de





**Figura 14.** Riesgo medio (superior) y absoluto (inferior) de las componentes de inundación costera en los municipios costeros del Maresme (ver municipios en la Fig.1).

valores, los resultados representan distintos modos de riesgo. En el caso de asumir que en ambos casos los daños son equiparables, sí se podrían integrar todas las componentes. Por otro lado, el uso de esta metodología sencilla permite un primer análisis territorial para la identificación a nivel regional de las áreas más sensibles a sufrir riesgo de inundación, y de determinar la componente de inundación costera más relevante.

Los resultados obtenidos permiten caracterizar la costa del Maresme como un área con un riesgo relativamente bajo a verse afectada por inundaciones.

Esta valoración global no impide que a lo largo de los aproximadamente 45 km de costa que estudiamos, nos encontremos con puntos singulares donde el riesgo incrementa significativamente, con respecto

a las zonas adyacentes. Estas singularidades se verifican generalmente de forma diferenciada, según la componente de la inundación. Así, por ejemplo, si se considera la SNM (aunque la magnitud de la subida es la misma a lo largo de toda la costa), los efectos sólo resultan significativos en el Delta del Tordera y bajo el escenario más extremo considerado. Por ello, y siempre hablando en términos de inundación, el área de estudio puede considerarse como con un riesgo muy bajo a la SNM, excepto en el caso de considerar escenarios muy pesimistas y con una significancia local.

En el caso de la componente asociada al impacto de tormentas costeras, la presencia de puntos singulares por su sensibilidad a lo largo de la costa están determinados

por la morfología local, que produciría variaciones a lo largo de la costa en la magnitud de la amenaza. En este caso, y a diferencia de la componente a largo plazo, se detectan variaciones significativas a lo largo de la costa, aunque éstas se verifican a pequeña escala (muy localmente), de forma que, si se integran al nivel municipal, pueden quedar ocultas. Por ello es recomendable que a la hora de analizar esta componente, se retenga el nivel de detalle máximo, para no terminar ocultando el riesgo existente. Al igual que en el caso de la SNM, el riesgo medio es relativamente bajo, con unos pocos puntos sensibles donde aumenta significativamente. Finalmente, la componente restante también presenta una serie de singularidades, en este caso dadas por las características de las cuencas de las rieras que están en el territorio y la extensión de la zona inundable, siendo los municipios de Pineda de Mar (14) y Sta. Susana (15) los de mayor riesgo.

La determinación y evaluación de las principales componentes de inundación costera, así como los diferentes valores expuestos, nos permite identificar la necesidad de una gestión del riesgo diferenciada a lo largo del territorio, orientada a la adaptación y/o la mitigación de una componente en particular. Así, hay tramos costeros en los que la mayor parte del riesgo está controlado por amenazas de origen terrestre, y otros en los que los procesos son a muy largo plazo de tal forma que las medidas de adaptación puedan implementarse de forma progresiva. Por último, hay zonas muy específicas donde la existencia de amenazas significativas de origen marino requieren de medidas locales.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de los proyectos de investigación PaiRisC-M (CTM2011-29808) y PaiRisClima (GL2014-55387-R) financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad y RISCKIT (Grant No. 603458) y RISES-AM (Grant No. 603396) financiados por la Unión Europea. La autora principal ha sido financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de una beca FPI. Los autores también agradecen a Puertos del Estado (Ministerio de Fomento) por la aportación de datos de oleaje.

## Funding

This work was supported by the European Commission [603458]; Ministerio de Economía y Competitividad [CGL2014-55387-R].

## Bibliografía

ACA. (2015). *Agència Catalana de l'Aigua* [Agencia catalana del agua]. Generalitat de Catalunya. Recuperat Abril 21, 2015.

- Barnolas, M., & Llasat, M. C. (2007). A flood geodatabase and its climatological applications: The case of Catalonia for the last century [Una base de información geológica y sus aplicaciones climatológicas: el caso de Catalunya en el último centenario]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(2), 271–281.
- Brenner, J., Jiménez, J. A., & Sardá, R. (2006). Definition of homogeneous environmental management units for the Catalan coast [Definición de unidades de administración homogéneas del medio ambiente en la costa catalana]. *Environmental Management*, 38(6), 993–1005.
- Broxton, P. D., Zeng, X., Scheftic, W., & Troch, P. A. (2014b). A MODISBased 1 km maximum green vegetation fraction dataset [Un conjunto de datos basado en 1 km del MODIS acerca de la fracción máxima de vegetación verde]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0356.1
- Bruun, P. (1962). Sea level rise as a cause of shore erosion [Subidas en el nivel del mar como causa de la erosión de las costas]. *Journal of the Waterways, Harbors, and Coastal Engineering Division*, 88, 117–130.
- Bosom, E. (2014). Coastal vulnerability to storms at different time scales. Application to the Catalan coast [Vulnerabilidad de la costa Catalana a tormentas con escalas variables de tiempo] (Tesis Doctoral), Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech, Barcelona.
- Ceru, J. (2012). Flash flood potential index for Pennsylvania [Índice potencial de inundación rápida para el estado de Pennsylvania]. *ESRI federal GIS conference*; 2012.
- EC. (2007). Directive 2007/60/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks [Directiva 2007/60/EC del Parlamento Europeo y del Consejo del 23 de octubre 2007 acerca del asesoramiento y la administración de riesgos de inundación]. *Official Journal L*, 288, 27–34.
- EEA. (2006). The changing faces of Europe's coastal areas [Las caras cambiantes de las zonas costeras de Europa]. *European Environment Agency*. Copenhagen.
- EEA. (2013). Balancing the future Europe's coasts [Balanceando el futuro de las costas europeas]. *European Environment Agency*.
- ESDAC. (2015). European soil data centre [Centro de datos de información sobre el suelo europeo]. European Commission; 2015. (Acceso 3 Sept 2015) <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/>
- ESDAC. (2015). European soil data centre [Centro de datos de información sobre el suelo europeo]. European Commission; 2015. (Acceso 3 Sept 2015) <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/>
- Fleta, J., Godé, L., Gomá, J. L., Gracia, À., Gracia, J., Martínez, J., ..., Verdague, I. (2006). Flooding areas and risk analysis of Catalonia (INUNCAT Plan) [Inundación de áreas y análisis de riesgos en Catalunya (Plan del INUNCAT)], II(1), 458–460.
- Gallien, T. W., Schubert, J. E., & Sanders, B. F. (2011). Predicting tidal flooding of urbanized embayments: A modeling framework and data requirements [Estructura del modelo y requerimientos para predecir la inundación de costas y bahías urbanizadas por mareas marítimas]. *Coastal Engineering*, 58(6), 567–577.
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., ..., Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods [Una compilación de datos

- sobre inundaciones rápidas en Europa]. *Journal of Hydrology*, 367(1–2), 70–78.
- Gouldby, B., Samuels, P., Klijn, F., Van OS, A., Sayers, P., & Schanze, J. (2005). *Language of risk - Project definitions* [Definiciones de proyecto: el idioma del riesgo]. EU Floodsite project. [http://www.floodsite.net/html/partner\\_area/project\\_docs/FLOODsite\\_Language\\_of\\_Risk\\_v4\\_0\\_P1.pdf](http://www.floodsite.net/html/partner_area/project_docs/FLOODsite_Language_of_Risk_v4_0_P1.pdf)
- Green, C., Viavattene, C., & Thompson, P. (2011). Guidance for assessing flood losses [Guía para el asesoramiento de pérdidas por inundación]. *Deliverable 6.1*. FP7 EU Project, CONHAZ.
- Guedes-Soares, C., Weisse, R., Carretero, J. C., & Alvarez, E. (2002). A 40 years hindcast of wind, sea level and waves in European waters [Retrospectiva de 40 años de viento, nivel del mar y olas en aguas europeas]. In *Proceedings of the 21st international conference on offshore mechanics and Arctic engineering*. Oslo, Norway. 2002; 669–75.
- Hinkel, J., Jaeger, C., Nicholls, R. J., Lowe, J., Renn, O., & Peijun, S. (2015). Sea-level rise scenarios and coastal risk management [Escenarios de subida del nivel del mar y la administración del manejo de riesgos]. *Nature Climate Change*, 5, 188–190.
- Holdgate, M.W. (1979). A perspective of environmental pollution [Una perspectiva acerca de la contaminación ambiental]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- ICGC. (2015). Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya [Instituto cartográfico y geológico de Cataluña]. Generalitat de Catalunya. Recuperat Oct 7, 2015 de <http://www.icc.cat/>
- Ibáñez, J. J., & Burriel, J. A. (2010). Mapa de cubiertas del suelo de Cataluña: Características de la tercera edición y relación con SIOSE. Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 179–198.
- IDESCAT. (2014). *Anuari Estadístic de Catalunya* [Anuario estadístico de Catalunya]. Institut d'Estadística de Catalunya, Generalitat de Catalunya. Recuperat Dic 10, 2014 de <http://www.idescat.cat/pub/?id=aec&lang=es>
- IPCC. (2015). *Climate change 2014: Synthesis report*. Contribution of working group I, II and III to the Fifth Assessment report of the Intergovernmental panel on climate change [Cambio climático 2014: Reportaje de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III hacia el reporte de asesoramiento del grupo intergubernamental sobre el cambio climático]. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Jiménez, J. A., Sancho-García, A., Bosom, E., Valdemoro, H. I., & Guillén, J. (2012). Storm-induced damages along the Catalan coast (NW Mediterranean) during the period 1958–2008 [Daños inducidos por tormentas a lo largo de la costa catalana en el noroeste del Mediterráneo durante el periodo de 1958 al 2008]. *Geomorphology*, 143–144, 24–33.
- Jiménez, J. A., Armaroli, C., Berenguer, M., Bosom, E., Ciavola, P., Ferreira, O., ..., Sempere, D. (2015). Coastal hazard assessment module [Módulo de asesoramiento de riesgos costeros]. *RISCKIT Deliverable D2.1*. [http://www.risckit.eu/np4/file/23/RISCKIT\\_D.2.1\\_Coastal\\_Hazard\\_Assessment.pdf](http://www.risckit.eu/np4/file/23/RISCKIT_D.2.1_Coastal_Hazard_Assessment.pdf)
- Kron W. (2012). Coasts: The high-risk areas of the world [Las costas: áreas de alto riesgo del mundo]. *Natural Hazards*, 66(3), 1363–1382.
- La Caixa. (2013). *Anuario Económico de España, 2013. Caja de Ahorros y Pensiones de Barcelona*. Barcelona. Recuperat October 2, 2015. <http://www.anuarioeco.lacaixa.comunicacions.com/java/X?cgi=caixa.anuari99.util.ChangeLanguage&lang=esp>
- Le Cozannet, G., Garcin, M., Yates, M., Idier, D., & Meyssignac, B. (2014). Approaches to evaluate the recent impacts of sea-level rise on shoreline changes. [Mecanismos para evaluar los impactos recientes en la costa de subidas en el nivel del mar] *Earth-Science Reviews*, 138, 47–60.
- Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., & López, L. (2009). A press database on natural risks and its application in the study of floods in Northeastern Spain [Una base de datos de la prensa sobre riesgos naturales y su aplicación en el estudio de las inundaciones en el noreste de España]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9, 2049–2061.
- Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Rodríguez, A., & Lindbergh, S. (2010). Flash floods in Catalonia: A recurrent situation [Inundaciones rápidas en Catalunya: una situación recurrente]. *Advanced Geosciences*, 26, 105–111.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., & Gaume, E. (2010). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management [Caracterización de inundaciones rápidas extremas seleccionadas en Europa e implicaciones para el manejo del riesgo por inundación]. *Journal of Hydrology*, 394(1–2), 118–133.
- Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C. Meyer, V., Tunstall, S., & Van der Veen A. (2007). *Evaluating flood damages: Guidance and recommendations on principles and methods* [Evaluación de los daños por inundación: ayuda y recomendaciones en cuanto a principios y métodos]. EU Floodsite project N. GOCE-CT-2004-505420.
- Narayan, S., Nicholls, R. J., Clarke, D., Hanson, S., Reeve, D., Horriño-Caraballo, J., ..., Vanderlinden, J. P. (2014). The SPR systems model as a conceptual foundation for rapid integrated risk appraisals: Lessons from Europe [El modelo para sistemas SPR como una fundamento conceptual para asesorar riesgos integrados rápidamente: Lecciones de Europa]. *Coast Engineering*, 87, 15–31. DOI: [10.1016/j.coastaleng.2013.10.021](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.021)
- Nicholls, R. J. (2004). Coastal flooding and wetland loss in the 21<sup>st</sup> century: Changes under the SRES climate and socio-economic scenarios [Inundación costera y pérdida de pantanales en el siglo 21: Cambios bajo los escenarios climáticos SRES y socio-económicos]. *Global Environmental Change*, 14(1), 69–86.
- PAP/RAC. (2007). *ICZM Protocol in the Mediterranean* [Protocolo del ICZM en el Mediterráneo].
- Poulter, B., & Halpin, P. N. (2008). Raster modelling of coastal flooding from sea-level rise [Modelo por raster de la inundación de costas por subidas en el nivel del mar]. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(2), 167–182.
- Penning-Rowsell, E. C., Priest, S., Parker, D., Morris, J., Tunstall, S., Viavattene, C., ..., Owen, D. (2013). Flood and coastal erosion risk management: A manual for economic appraisal [Administración de riesgo de inundación y erosión de la costa: Un manual para valorar la economía]. London and New York: Routledge.
- Pullen, T., Allsop, N. W. H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H., & Van der Meer, J. W. (2007). EurOtop. Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual [Sobrepaso del mar a las defensas y estructuras relacionadas: Manual de asesoramiento]. [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com)

- ## Apéndice

		Consecuencias				
Indicadores de exposición		1 Inexistente o muy bajo	2 Bajo	3 Medio	4 Alto	5 Muy alto
<b>Usos del suelo (<math>e_{US}</math>)</b>	Perspectiva Antropogénica	-Suelo desnudo (1,5) -Humedales (1,5) -Matorrales (1,5)	-Bosque -Parques urbanos	-Playa y dunas -Cultivos	- <i>Camping</i> -Industrial	-Urbano
	Perspectiva Natural	-Industrial -Urbano	-Suelo desnudo (1,5) -Camping -Parques urbanos	-Matorrales -Cultivos	-Playa y dunas	-Humedales (1,5) -Bosques
<b>Sistema de transporte (<math>e_{ST}</math>)</b>		< 250	250-500	500-1.000	1.000-2.000	> 2.000
<i>Metros de ferrocarril y carreteras afectadas por inundación</i> (Riadas/SNM)						
<i>Presencia</i> (Inundación marina)		No existen carreteras	Carretera local	Carretera Nacional	Red ferroviaria	Carretera Nacional y red ferroviaria
<b>Servicios e infraestructuras críticas (<math>e_S</math>)</b>		No existen servicios críticos	Servicios de importancia local	Red básica de servicios críticos de importancia local y regional	Alta densidad de la red de servicios críticos a nivel regional	Red de servicios críticos de muy alta densidad, de importancia nacional e internacional
<b>Actividad económica (<math>e_{AE}</math>)</b>		< 45	45-89	89-133	133-177	> 177
<i>Índice turístico</i> (Inundación marina/SNM)						
<i>Índice industrial</i> (Riadas)		< 78	78-154	154-231	231-307	> 307
<b>método: equal interval [intervalo equivalente]</b>						
<b>Vulnerabilidad social (<math>e_{VS}</math>)</b>		≤ -4,4	-4,4 -(-1,8)	-1,8-(-0,2)	-0,2-1,8	> 1,8
<i>Índice de vulnerabilidad social</i>						
<b>método: natural breaks interval [intervalo natural]</b>						